

# カンボジア・アンコール石造寺院遺跡の風化破壊

池 田 碩\*

The Weathering-erosion of Stone Temple Relics in the Angkor Area of Cambodia

Hiroshi Ikeda

## 要 旨

熱帯サバナ気候下に位置するカンボジア・アンコール地域の地盤の安定度と、石造遺跡の風化状況について調査した。その結果、地質地盤は安定陸塊上に位置しているが、寺院遺跡は環濠の掘り込みとその土砂による盛り土の上部に構築されているものが多いため、表層地盤は不等沈下や流動による被害が生じている状況を各地で確認した。

石造遺跡の石材の風化は長年月を経て全体に進行してきているが、風化による剥離破壊は石材の限られた部分で急速に進んでいる。その部分と剥離破壊の状況は、自然界に生じているタフォニTafoni侵食と極めて類似していることがわかった。

さらに風化破壊の速度は、砂岩石柱に生じている剥離破壊深が7～10cmに達しており、遺跡の構築がすでに800年程経過していることから、ほぼ100年間で1cmの速度で進行してきていることが推測できた。

【キーワード】 アンコール石造遺跡群 地盤の不等沈下と流動 石材の風化と剥離破壊 Tafoni

## 1. はじめに

筆者の専門分野である「地形学」の立場より、これまで「岩石」の風化過程やその速度とその結果出現する微地形について調査してきた。

その場合、特に岩石・岩種の相異による違いや、気候環境の相異による違いを中心に追及するために、世界各地から主要な観察・観測地点を選び現地調査を行ってきた。

ところが、1997年インド南東部のKanchipuramとMahabalipuramで8世紀構築の古代寺院にみられる石造遺跡の深刻な風化破壊に接し、その状況を報告した。それを機に、貴重な古代石造遺跡の保全・保護のための基礎的資料としての研究も大事な分野であることに気づき、これまで進めてきた自然環境下での研究の応用分野としての開拓を進めている。

すでに熱帯サバナ気候下におけるインドの花崗岩・砂岩遺跡地での報告のほか、乾燥気候下のシリアPalmyraの紀元前・後にかけて構築の石灰岩遺跡地域、地中海性気候下のほぼ同時代のレバノンTyreの石灰岩遺跡地域について報告した。

平成17（2005）年9月20日受理 \*文学部地理学科教授

Faculty of Letters, The Professor,  
Department of Geography

今回は、熱帯サバナ気候のカンボジアで、12～15世紀に建造された巨大な石造寺院Angkor地域(図-1)での調査結果を報告する。

石造遺跡の場合は、自然環境下で形成されている微地形のように長期間におよぶ変化・変質の状況をとらえることはできないが、短期間に限られるとはいえ、石造遺跡の構築年代が明確であり、それ以降の微妙な変化・変質の状況を具体的に観察・観測でき、その間の風化年代を割り出せる利点がある。この点をこれまでの研究にも生かしつつ自然環境下に形成されている微地形と石造遺跡の風化の状況に関する調査・研究を共に補完しつつ進めていくことにする。

## 2. アンコール周辺地域の環境

### A. 石造遺跡群の構築時代

アンコール遺跡群は、再発見されるまでカンボジア内陸部の熱帯サバナ気候地域のジャングル内に埋もれていた。巨大な石造寺院の構築時、すなわちアンコール時代は802～1431年にかけてであった。当時周囲は高木の森林地域であったが、9世紀以降密林を切り開きヒンズー教から仏教都市へと開発が進められた。まず、802年・ジャヤヴァルマン2世が即位し、アンコール朝を創設する。889年・アンコール首都造営が、プノンパゲンの丘を中心に4km<sup>2</sup>の範囲で始まる。1113年・アンコールワットの構築が、ジャヤヴァルマン7世によって始まる。巨大な石造寺院の第3回廊に位置する中心塔頂は、その高さが65m(セメントなどのつなぎ材を使用せずで20階建ビルに相当)に達する。1200年代が、アンコール王朝の最盛期であった。しかし、1353年頃から隣国ベトナムのチャンパ軍の攻略を受けるようになり、さらにシャム(タイ)のアユタヤ朝に攻略されて、1431年・アンコール王朝は陥落した。

以後、この地域一帯は放棄され、そのうちに開発前同様の高木の森林が遺跡群をも覆うようなジャングルと化した。そして400年が経過。フランス人の博物学者アンリ・ムオHenri Mouhotが1860年に遺跡を再発見し、調査が開始されることになった。だがその後も不安定な政治状況が続き、第2次大戦後にフランスから独立したが、戦後もポルポトによる内乱が続いた。やっと1990年代後半になって安定へと向かい出したのを機に、一帯の遺跡群は1992年にユネスコの世界危機遺産に登録<sup>1)</sup>され、本格的な調査と修復作業が始まった。しかし今なお地雷が埋ったままの地域が広がり、自由な調査は不可能な状態である。日本政府も1994年にアンコール遺跡救済チームを組織し修復に着手。現在は早稲田大学・上智大学・日本大学・奈良文化財研究所などが長期滞在し作業を継続している<sup>2)</sup>。

### B. 地形・地盤

遺跡地域の地形・地盤は、安定した Gondwana ランド大陸塊の部分に当る平原上に位置しているため、我が国のように地震の心配は無い。前記したような65mにも達する高層の巨大な石積み構築寺院の立地条件には恵まれている<sup>3)</sup>。しかしながら石造寺院の構築に当たっては、寺院の周囲を取り囲むように大きな水路(濠)を防御と水防さらに灌漑用水路確保のため掘り、その結果生じた土砂で寺院内部を盛り土し、地盤を高めた上に構築している。このため寺院内部の土地は安定しているとはいえない。むしろ盛り土地であり不安定な部分も多く、現在寺院内で地盤の不



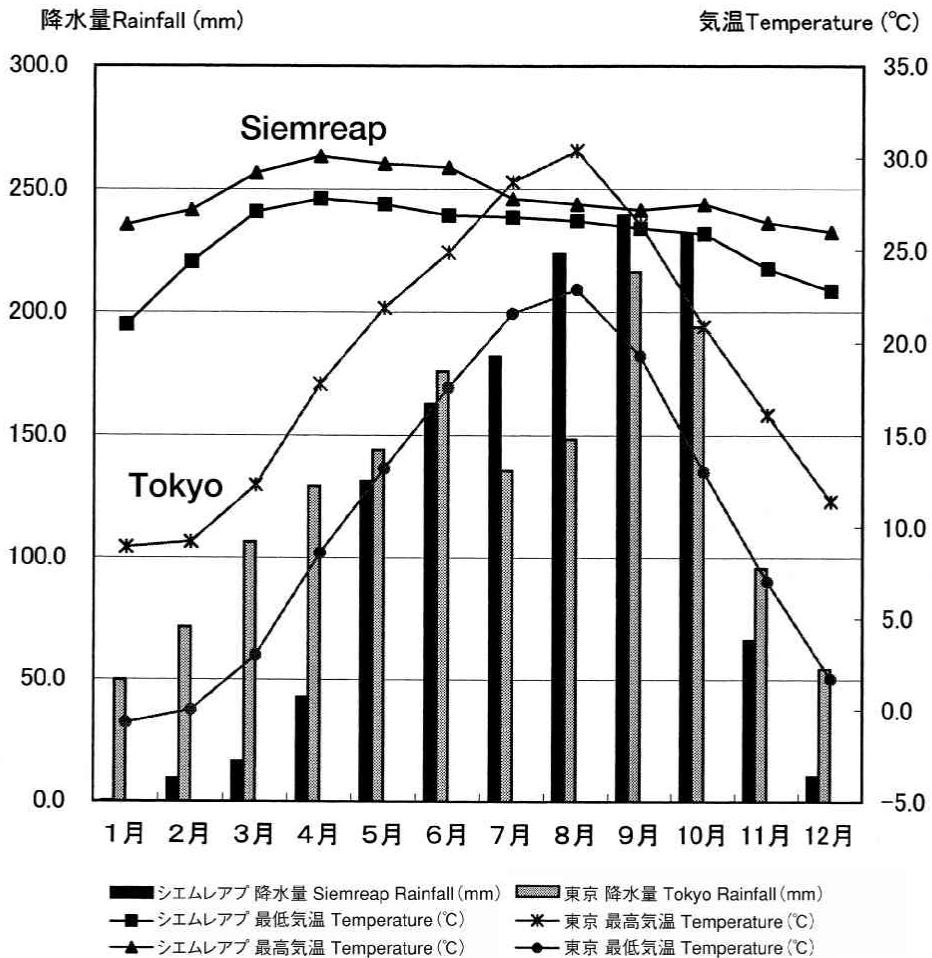


図-2 シエムレアプの気温と降水量  
Fig-2 Temperature and Rainfall in SIEMREAP  
(near the study cities)

#### D. 植生

周辺の植生は自然状態では、高木のジャングルと化するため「森林の国」と称されている。この地の遺跡群も15世紀以降は放棄され、廃墟となっていたため、140年程前にアンリ・ムオに再発見されるまでの、わずか400年間で遺跡群を覆いつくすほどの鬱蒼とした樹林（主としてガジュマル、現地ではスポアン榕樹と呼ばれる）地域へとどっていた。その状況がわかるようにして保存・保護されているのが、遺跡地の一部であるタ・プロムTa Prohm寺院である。樹枝が石造寺院の表面だけではなく屋根上にも伸びており、具体的に現場を観察してみると遺跡の石積み各部が大きく開き、破壊されている状況がよくわかる。その状況は、カラー写真Cページの項で説明する。

### 3. アンコール遺跡群の破壊の実態

石造遺跡群の破壊の実態を、A.遺跡立地地盤の不等沈下とそれに伴う地盤流動の実態例。B.石材の風化破壊の実態例。C.熱帯サバナ気候下の樹林の成長に基づく遺跡の破壊例。この順にカラー写真で具体的に現場の状況を示し説明する。世界遺産指定地であるため分析資料としてもサンプルの採取は禁じられているため、観察・観測の結果を中心に考察を加えた。

#### 写真A ページ. 遺跡立地地盤の不等沈下とそれに伴う地盤流動の実態

地質構造的には、ゴンドワナ盾状地の一部としての安定陸塊の一部であり、地震も無い。A-1の空中写真を見てもアンコール・ワットAngkor Watの周辺は広い低平な安定地域のように見える。アンコール・ワットは、12世紀構築の南北1300m・東西1500mの環濠の内部に立地している最大規模のヒンズー教寺院である。寺院の構築に当っては、図-1に示すように、寺院の周囲を広い環濠で取りまいており、さらに寺院の東西両側にはバライBarayという灌漑用の溜池が掘り込まれている。寺院は洪水対策も兼ね、掘り込みによってもたらされた大量の土砂で盛り土をして嵩上げをした上に構築されている。そのために、地下地盤は安定していても寺院内部の表層の地盤は各部で不等沈下や流動により不安定な状況を呈している。ここでは具体的に2例を示す。

A-2は、アンコール・ワットAngkor Watへ向かう参道が、幅180m程ある広い環濠を横断する部分の道路面の沈下状況である。濠を横断する参道の中央部ほど沈下しているため、道路面が沈下・流動している状況がよくわかる。このため、現在この部分の参道を左・右に2分し、写真右片側の修復工事を終えた部分を使用、左片側の未修復部分は不通となったままである。

A-3は、バンテアイ・スレイBanteay Srei寺院。967年構築のヒンズー教寺院である。寺院を取り囲む周囲400mの環濠というより、ここは広い掘り込み池中の築島部分に構築されたような寺院である。このため、石造寺院自体が濠の方へと流動している典型的な事例である。この写真では、前方や右方に向かって石積み壁が沈下・流動して傾いている状況がよくわかる。バンテアイ・クデイBanteay Kdei寺院でも地盤沈下が激しく進んでおり、石造遺跡が傾き倒壊す前に至っている部分がある。

#### 写真B ページ. 石材の風化破壊の実態例

B-1は、1181年に着工され13世紀初めに構築されたアンコール・トムAngkor Tom仏教寺院である。その中心となる遺構であるバイヨンの第1回廊の部分にある砂岩からなる石柱のうち、近接して存在しつつも風化状況を異にしている3本の石柱に生じている風化破壊の状況を比較し観察した。

カラー写真で示す3本のうち左側の石柱は中粒の砂岩であるが、石材としては層理面を横に使用している。石柱のうち風化破壊が進んでいる部分の高さは40~100cmの間であり、その間では堆積時の状態を示す層理の性格が良く出ている。中央の石柱は中粒の砂岩であるが、石材としては層理面を縦に使用している。このため風化破壊の状況もクラックが縦方向に現れているのが特徴である。風化破壊の進む部分の高さは40~150cmの間であり、左側の石柱より上方まで層理に沿っ

てクラックが生じ、めくれるように破壊している。右側の石柱は細粒・均質の砂岩であり層理は見られない。風化破壊が2層に分かれて最も激しく進んでいる。まず、表層部の破壊は高さ50～150cmの間で進み、そこでは表面より約7～10cmの深さにかけて小円状の窪み群とそれらの結合により拡大した皿状の窪みの部分が石柱の表面を覆っている。その下方30～50cmにかけての高さの部分では、さらに5cm程深くまで下方から上方へ向けてえぐられる形状で破壊が進んできている部分がある。つまりこの石柱では、2段階（2層）の風化破壊の進行状況を示しているのが特徴である。

共通する点は、3本の砂岩石柱共に風化破壊の進んでいる部分は、石柱の上方ではなく下端部でもない。破壊が進んでいるのは上方が150cm位までで、下方が30cm位より上方にかけてであり、この間のほぼ30～150cmにかけてであることに特に注目しておきたい。

B-2は、1113年に着工され12世紀前半構築のアンコール・ワット Angkor Wat ヒンズー寺院である。3枚のカラー写真は、アンコール・ワット第1回廊の砂岩の石柱に生じている風化破壊の状況を示す。風化破壊は、石柱の下端から上方に向かって50～60cmの高さにまで進行しており、破壊され剥離した結果欠如した深さは石柱の左右両側分を合わせるとすでに石柱直径の3分の1に達している点に注目したい。

B-2上は、第1回廊とその石柱列を示す。いずれの石柱も下端部から上方へ向かって風化破壊による剥離が進んでいる。

B-2右下も同様に石柱列のいずれも下端部から上方へ向かって風化破壊が進んでおり、石柱表面に描かれた仏像の彫刻も下半分が欠如している状況がよくわかる。

B-2左下は、風化破壊が激しく、めくれ上がるように上方へ向かって剥離が進んでいる典型的な石柱の例の下端部分を拡大したものである。この部分を観察し計測してみると、35cm角の砂岩

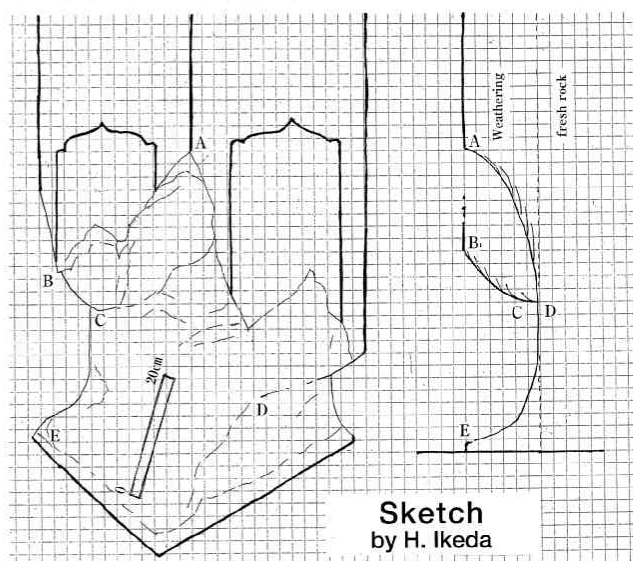


図-3 風化破壊の進展 (B-2左下)

Fig-3 Formation of Weathering

石柱のうち、深さ7～8cmが剥離し欠如している。その上端は60cmの高さに達しており、さらに上方へとめくれ上がるように剥離している。全体の風化破壊の状況をさらに詳細に観察してみると、剥離し欠如している部分はスケッチ(図-3)で示す様に下部と上部の2層に分かれていることがわかる。このうち上部層すなわち石柱表面の部分が急速に剥離していることから、石柱の表面近くは見かけ上は安定しているように見えるが、長年におよぶ劣化によりその内部はパンケーキ状に至っていることが想定でき、下部はパンケーキ状の風化劣化部が除去された部分と



写真ページA：地盤の不等沈下とそれに伴う地盤流動の実態

Page A : Differential Subsidence and Accompanying Ground Surface Flow Conditions





写真ページB-1：石柱の30～150cmにかけて生じている剥離・破壊の実態

Page B-1 : Exfoliation and Weathering-erosion of Stone Pillars at 30-150cm Height





写真ページB-2：石柱の0～60cmにかけて生じている剥離・破壊の実態

Page B-2 : Exfoliation and Weathering-erosion of Stone Pillars at 0-60cm Height



写真ページC：樹木の成長に基づく石造遺跡の破壊の実態

Page C : The Destruction of Stone Temple Relics Due to Jungle Forest Growth





推察した。

なお、この遺跡は構築からほぼ800年経過しており、風化破壊し除去している深さが7.5cmに達していることから推定すると、100年で1cm弱の速度で破壊してきたことになる。しかし、すでに石柱全体の風化劣化が進んできていることを考えると、今後はさらに急速に破壊していくものと想定する。

#### 写真Cページ．熱帯サバナ気候下の樹林の成長に基づく石像寺院遺跡の破壊例

1186年構築のタ・プロームTa Prohm仏教寺院の状況である。東西1000m・南北700mの寺院内部の石造建造物が、成長した高木ガジュマル（現地ではスポアン）の幹と気根によって押しつぶされそうになり、その一部は回廊の屋根上にまで覆いかぶさっている。樹高は30mを越すものもあり、気根の成長は石組みの隙間を広げ破壊を進めている。アンリ・ムオによって再発見された当時は、アンコール遺跡群全体がこの寺院のような状態であったという。現地ではタ・プローム寺院を、この地域の自然環境の実態として、自然の猛威と遺跡保存の困難さを理解できるような場として、あえて樹木の除去を行わずに現状のまま保存することになっている。

#### 4. 砂岩石柱の風化破壊とタフォニ侵食

石柱の風化破壊の実態を3-Bで2例取り上げ、そこでの観察の結果と測定から得られた注目すべき特徴を記した。すなわちB-1で示した石柱で破壊し剥離侵食が生じていたのは、3本の石柱共に石材全体に同質・同状態に進んでいるのではなく、石柱の下端より30cmから上方で、150

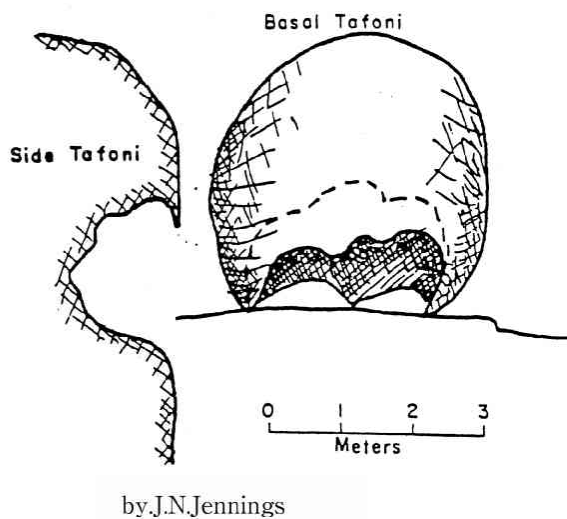


図-4 タフォニの形成部位

Fig-4 Two Locations of Tafoni Weathering on Nature and Stone Pillars



cmまでの高さの間であった。このような剥離侵食の生じる高さと形状は、自然状況下の風化浸食ではタフォニTafoni侵食<sup>9)10)11)12)</sup>のうちのサイドタフォニSide Tafoniの形成部と形状さらには生成状況が極めて類似していることに注目したい。さらにB-2で示した石柱で破壊と侵食が生じていたのは、石柱下端から上方へ向かってすなわち0cmから50~60cmの高さにかけてであった。これは自然状況下の風化浸食では、タフォニ侵食のうちのベイサルタフォニBasal Tafoniの形成部と形状が類似(図-4)している<sup>13)</sup>。

このことから今回調査したアンコール地域の石柱に生じている風化劣化による剥離浸食破壊は、自然界で生じるタフォニ風化による微地形と同様の状況を示していることがわかった。しかもこの地域での砂岩石柱に生じているタフォニ侵食の形成速度は、石造寺院の構築からすでに800年経過しており、B-1右側の石柱やB-2左下の石柱の侵食深が7~10cmに達していることから、ほぼ100年間で1cmの速度で進行していることが推測された。

この速度は筆者がこれまでに計測してきた結果、自然界の場合では韓国東部の注文津海岸で得た値が1年で1mm位であった。インド東南部の石造寺院の屋外では、1300年間に数10cm~1mであった。アンコールの場合は、両者より若干低い値ではあるが、それは調査した石柱が建造物の内部に位置することの影響も大きいと考えた<sup>14)15)16)17)18)</sup>。

## 5. さいごに

熱帯サバナの高木樹林帯に一時は埋没していた世界的な石造遺跡群であるアンコール地域の現状を、短期間であったが調査する機会を得た。

その結果、地質地盤自体は陸塊上に立地しており地震も無く安定しているが、遺跡である寺院は構築時に環濠を掘り、その土砂で盛り土をして嵩上げた土地の上に築いているため、表層地盤の不等沈下や地盤の流動による被害が各地で発生しており、その状況の一部を現地で確認できた。

石造寺院では、同時に形成された石材であっても長年月の経過による風化・劣化が同様に進んでいるわけではなく、特定な部分に集中して進んでいることがわかった。例えば砂岩石柱の場合、高さ30~150cmの間が集中して風化浸食を受けて破壊されている例と、石柱の下端から高さ60cm位にかけて激しく風化破壊されている例とがあること。それは自然界で生じているタフォニのうちのSide TafoniとBasal Tafoni微地形の形成と同状況であることがわかった。

さらに、この地域の石柱の風化浸食による剥離は深い部分で7~10cmに達しており、石造遺跡は構築から800年ほど経過していることからほぼ1cm=100年の速度で進行してきていることが推測できた。

このような結果を、今後の石造遺跡の保全を考察していく場合の資料として使用してもらいたい。

なお、今後も調査の機会を得られるように努め、石造遺跡群のうちSide TafoniとBasal Tafoniの進む部分の場所や環境の相異を明らかにしたい。さらには石造遺跡という人工物ではなく、周辺の自然地形に形成されているTafoni微地形との対比も行いたいと考えている。

## 註

- 1) 日本ユネスコ協会連盟編 (2000)：ユネスコ世界遺産,平凡社.
- 2) 石澤 良昭 編著 (1995)：アンコールワット—密林に消えた文明を求めて—,創元社.
- 3) 盛合 禧夫 (2000)：アンコール遺跡の地質学, (有) 連合出版.
- 4) 古都 浩 (2004)：カンボジアのアンコール遺跡とその修復,地学雑誌111巻4号.
- 5) 理科年表 (2005)：丸善書店.
- 6) <http://www.ryoko.info/Temperature/Cambodia.html>
- 7) [http://tabi.nikkeibp.co.jp/tab/t\\_asia.html](http://tabi.nikkeibp.co.jp/tab/t_asia.html)
- 8) 藁谷 哲也 (2004)：アンコールワットにおける石材の風化に関する温湿度の年変化,日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要 第39号.
- 9) 松倉 公憲 (1996)：石造文化財の保存 (2), 岩石・石材の風化速度,土と基礎44巻9号.
- 10) 谷本 親伯 (1997)：大スフィンクス修復保存学術調査報告,地盤工学会誌 45巻6号.
- 11) J.N.Jennings (1968)：Tafoni,The Encyclopedia of Geomorphology,Dowden Hutchinson.
- 12) 赤木 祥彦 (1981)：タフォニ,地学辞典,平凡社.
- 13) 池田 碩 (1998)：花崗岩地形の世界,古今書院.
- 14) ——— (1990)：韓国東北部海岸注文津付近にみられるTafoni地形とその形成過程,奈良大学紀要 第18号.
- 15) ——— (2002)：インドの石造寺院に生じているTafoni風化と遺跡の破壊,奈良大学紀要 第30号.
- 16) ——— (2004)：明治維新时期構築旧岩崎弥太郎邸赤レンガに生じているTafoni状風化,奈良大学紀要第32号.
- 17) ——— (2005)：Syria Palmyra石造遺跡群の風化状況,奈良大学紀要 第33号.
- 18) ——— (2005)：Lebanon Tyre周辺の地形と石造遺跡の風化状況,『文部科学省科学研究費基盤研究B 2, 課題番号14401029 (研究代表者 泉拓良) 報告書』(印刷中).

## The Weathering-erosion of Stone Temple Relics in the Angkor Area of Cambodia

by Hiroshi Ikeda

Nara University

Nara, Japan

This author did a brief survey of some long-lost, now world famous, stone temples in the tropical savannah jungle of the Angkor area of Cambodia. The area is geologically stable because it is located on part of the ancient Gondwana continental land mass. However, the temples were built on raised land formed from the soil dug out from around the site for a moat. As a result, the site has experienced differential subsidence and other ground movements, evidence of surface instability.

All parts of these temples were built at the same time of the same stone material, so weathering has progressed at the same rate for the same period of time. However, on closer observation, this author found that weathering has tended to be concentrated in particular places. For instance, some stone pillars tended to be weathered at 30–150cm above their base, while others tended to be weathered at 0–60cm above their base. Weathering of this tafoni type has been observed in nature as well.

This weathering-erosion has progressed to depths of 7–10cm since the temples were built some 800yBP, or at an average rate of 1 cm per century. This author anticipates that it will continue at least this rate in the future. This is considered to be a matter of great concern for the future of these temples. This author hopes that the results of this survey will be useful for the future protection of stone relics, there and elsewhere.

Finally, this author will actively seek other opportunities to continue surveys in this area. I will look for evidence of both "side-tafoni" and "basal-tafoni" on other stone temple etc. relics. Furthermore, I want to compare this kind of weathering to tafoni weathering in the surrounding natural environment.